心理学报 2022, Vol. 54, No. 1, 12−24
Acta Psychologica Sinica

https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2022.00012

基于成本最小化信息的社会性意图识别：来自脑电和行为的证据*

林 静[1] 黄量杰成[1] 何耘丰[1] 段继鹏[2] 尹 军[1]

([1] 宁波大学心理学系暨研究所，宁波大学群体行为与社会心理服务研究中心，浙江 宁波 315211)
([2] 华东师范大学心理与认知科学学院，上海 200062)

摘 要 与已有研究着重考察如何识别客体导向性意图(动作以物理对象为目标，而不涉及其他人)不同，本研究对人们如何识别社会性意图(动作以指向社会主体为目标以影响对方的交互行为)进行了探讨。基于两交互主体在整体层面应遵循效用最大化的分析，提出当 A 协助 B 达成目标状态所需要的成本小于 B 单独实现该目标状态所需要的成本时(简称为成本最小化信息)，其可被识别为具有社会性意图。通过在 B 面前设置栅栏的方法操纵成本最小化信息，以指示不同意图类型的脑电 μ 抑制程度、对不同变化的敏感性(辨别力)为指标，对该假设进行了检验。结果显示，相比客体导向性意图的控制条件(即 A 将目标物苹果放置在石头前)，当 A 将目标物苹果放置在被栅栏挡住的 B 前，其动作可减少 B 单独获取该苹果的动作成本，即符合成本最小化条件时，μ 的抑制程度更高(实验 1)，且对结构改变(某两个动画中充当相同角色的智能体互换)的辨别力更强，但对角色交换(某个动画中两个智能体的角色交换)的辨别力更弱(实验 3a)；而当栅栏不存在时，虽然 A 的运动路径与实验 1 相同，但 A 将苹果放置在 B 前的成本大于 B 自身获取苹果的成本，即不符合成本最小化条件，条件间 μ 抑制的差异消失(实验 2)，且对不同动作模式中变化的辨别相当(实验 3b)。鉴于已有研究表明社会性意图所诱发的 μ 抑制强于客体导向性意图，且人们对存在社会性意图的两个智能体间的结构改变更容易辨别，而对角色交换不敏感，故上述结果揭示，两个个体的行为是否满足成本最小化影响人们对动作意图的识别，支持成本最小化信息是社会性意图识别线索的观点。

关键词 意图识别，客体导向性意图，社会性意图，成本最小化，μ 抑制
分类号 B842

1 前言

人类通过丰富的动作或行为与外界物理客体和社会个体建立联系，以满足不同需求(Miller, 2001)。在观察这些复杂的行为时，人类的视觉系统在感知物理层面运动信息的同时，还可对其意图进行推理和识别，进而表征成具有目的指向性的动作模式(Blakemore & Decety, 2001)。动作意图识别存在高度的不确定性(Ullman et al., 2009)，例如：当手趋近茶杯时，既可将茶杯当作手的动作的目标(即伸手取到茶杯喝水)，也可将茶杯理解为手的运动应越过的障碍(即伸手越过茶杯抓取另一物件)。那么，人类视觉系统基于动作与对象间的哪些信息，才能够实现对动作意图的有效识别？

以往研究者针对动作指向物理客体以满足其需求的非社会性意图(即客体导向性意图，object-directed intention，其不涉及他人)的识别，开展了大量研究(Heineman-Pieper, 2009)，提出视觉系统将行为场景分为动作、目标(或结果)状态和情境因素三个基本要素；个体对这三个要素间关系的解释，遵循动作在情境因素的约束下以最小成本实现目标状态这一最根本的理性原则(Csibra et al., 2003; Gergely & Csibra, 2003)。Jara-Ettinger 等采用效用函数(Utility = Reward − Cost)来描述动作与目标的

收稿日期: 2020-08-29
* 国家自然科学基金面上项目(31871091)、宁波大学研究生科研创新基金(IF2020042)资助。
通信作者：尹军, E-mail: yinjun1@nbu.edu.cn；段继鹏, E-mail: jipengduan@outlook.com

关系，其认为由于行为主体具备理性这一根本特性，故动作遵循效用最大化的方式实现目标。因此，当其它条件不变时，若行为和当前所趋近的对象具有最大效用值时，则两者间具有目标指向关系(Jara-Ettinger et al., 2015)。然而，动作意图不仅包括以指向物理客体为目标的客体导向性意图，还包含以指向社会主体为目标，且影响对方行为的社会交互意图(Canessa et al., 2012; Hobbs & Spelke, 2015)，也即社会性意图(social intention)。针对社会性意图的识别(主要是指两人的交互，下同)，有研究者提出双方行为的耦合性(contingency)是关键决定因素之一，认为只要某一个体动作导致另一个体动作改变且具有即时同步性，二者间就可能被视为存在以交互为目的的指向关系(详见 de Jaegher et al., 2010 的综述)，如：握手。然而，后续研究表明，当两个个体共同追逐的某个目标被设置为不可见时，即使个体间行为存在耦合性，人们也难以识别二者间的意图；只有当追逐的目标可见时，其行为才被识别为具有社会性意图(Yin et al., 2013)。这类研究提示，除了行为的耦合性，人们也可能基于其它线索或信息对社会性意图进行识别(Auvray et al., 2009)。因此，本研究将进一步考察这一识别过程中可被利用的其他线索或信息。

社会性意图虽与客体导向性意图所指向的对象各异，但其执行行为的主体均是存在理性的智能个体，故也可基于动作效用最大化这一理性原则来分析交互意图的识别问题(Gergely & Jacob, 2012)。社会交互行为指向的对象是另一理性的社会个体，只分析某个个体的动作效用也许不适用于这类存在多个行为主体的情境。研究表明人们以整体的方式对交互行为进行表征，该表征方式暗示视觉系统可能在整体水平上对交互行为的效用最大化进行计算，也即对交互多方行为的收益和成本进行综合考虑(Török et al., 2019)。据此，当满足如下条件时：智能体 A 协助智能体 B 达成目标状态所需要的成本小于智能体 B 单独达成该目标状态所需要的成本时(简称为成本最小化，如递送他人较难拿到的物品)，其达到整体层面的效用最大化，可推测该动作模式被识别为具有社会性意图。也即，视觉系统在识别社会性意图时，可利用的线索包括成本最小化信息。但该假设并不排除社会性意图识别中存在其他线索的可能性，如上文提到的耦合性，仅假定成本最小化信息是社会性意图识别的充分而非必要条件。

本文中将采用脑电指标 μ 节律(8~13 Hz)对是否识别到社会性意图进行间接测量(如图 1 所示)。μ 节律位于感觉运动皮层(C3 和 C4 电极)，被认为产生于负责动作意图加工的重要功能区——镜像神经系统(Mirror Neuron System)，其中镜像神经系统活动越强，μ 抑制越大(Muthukumaraswamy et al., 2004; Oberman et al., 2005)。研究发现，由于社会性意图加工需同时考虑两个主体的行为，该加工相比只包含单个个体的非社会性意图的加工，对镜像神经系统的需求更高，因此激活也更强(Centelles et al., 2011)，而镜像神经系统的活动可体现在 μ 节律的抑制上，因此 μ 抑制的强度可用来指示被试是否将观察到的行为识别为社会性意图(Oberman et al., 2007; Yin et al., 2020)。其中，相比非社会性的客体导向意图行为，若某行为产生更强的 μ 抑制，则可说明其被识别为具有更强的社会性意图，且该

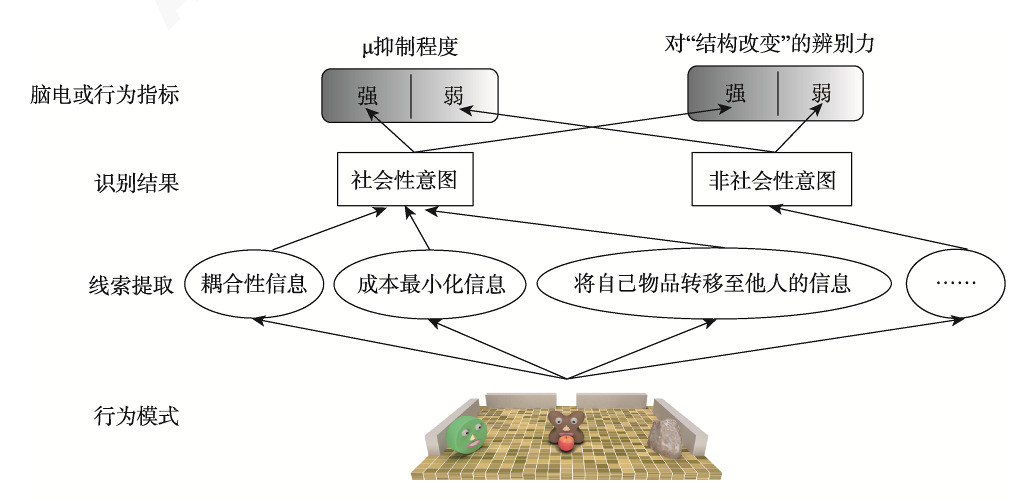


图 1　不同概念之间的关系图
注：指标中颜色越深代表 μ 抑制程度越强或对“结构改变”的辨别力越强。

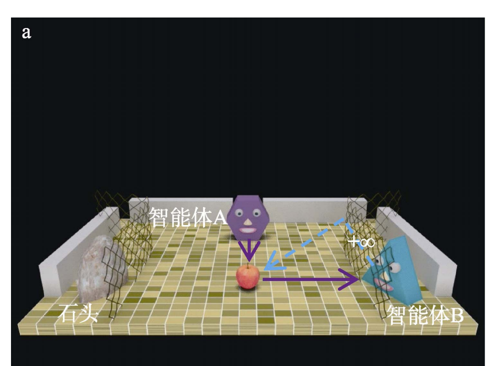




图 2 存在栅栏(a)和不存在栅栏(b)时，智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前或智能体 B 通过自身动作获得苹果的路径。

注：紫色实线为 A 的运动路径，蓝色虚线为 B 的运动路径，其趋近无穷大；橙色实线为 A 的运动路径，绿色虚线为 B 的运动路径。

指标已成功应用于社会性意图识别的相关研究(Oberman et al., 2007; Yin et al., 2020)。

为检验上述假设，本文借鉴 Heider 和 Simmel (1944)的方法以动画来描绘不同的行为模式(如图 2 所示的刺激场景)，其行为主体均简化为几何形状式的智能体，可用来模拟真实的交互场景且方便控制行为所引入的动作成本(Jara-Ettinger et al., 2015; Ullman et al., 2009)。本研究在动画中始终将智能体 B 保持静止，而智能体 A 转移目标物苹果，通过在 B 面前设置障碍物(即 B 是否被栅栏围住)的方法操纵 B 获得目标物苹果的成本。如此，若 A 将目标物苹果放置在 B 前面，由于智能体面前的物体被理解为归其所有(Tatone et al., 2015)，即 B 获得目标物苹果。当 B 前面存在栅栏时，由于其难以逾越该障碍物，此时 A 将该目标物放置在 B 面前的动作成本，小于 B 通过自身的动作获得该目标物的成本；但当 B 前面不存在栅栏时，则 B 通过自身的动作获得该目标物的成本(路径长度)小于 A 将该目标物放置在 B 面前的动作成本。由于存在栅栏时满足成本最小化条件，则该情境中 A 应被识别为具有社会性意图；而对不存在栅栏的条件，则被识别为非社会性的客体导向性意图或比存在栅栏时更弱的社会性意图。由于上述两种情境在物理层面存在差异(有无栅栏)，直接对比所发现的 μ 抑制差异可被物理层面的影响所解释。因此，将上述两种实验分别与控制条件进行比较，其被设置为在相同的情境中 A 采用同样的运动方式但将苹果放置在被栅栏围住的石头面前，该行为与 B 无关，属于典型的非社会性意图的行为模式(Tatone et al., 2015; Yin et al., 2020)。若人们确实可利用成本最小化信息这一线索识别社会性意图，则当 B 被栅栏围住时，A 将苹果放置在 B 面前(符合成本最小化)将被识别为具有社会性意图，其 μ 抑制强于控制条件——A 将苹果放置在石头前(实验 1)。但当 B 没有被栅栏围住时，无论 A 将苹果放置在 B 面前与否，均不符合成本最小化条件，因此 A 将苹果放置在 B 面前被识别为非社会性的客体导向意图或更弱的社会性意图，可预测 μ 抑制程度与控制条件下无差异或差异小于有栅栏的情境(实验 2)。

为进一步检验本研究提出的假设，本研究还采用了行为指标(如图 1 所示，检测被试对不同变化的敏感性，即辨别力)考察被试所识别的意图是否为社会性意图。实验采用变化觉察范式，要求被试记忆一系列相同动作模式的动画(记忆项)，之后要求被试判断检测阶段的动画(检测项)是否在记忆项中出现过(如图 7 所示)。其中，检测项的变化包括角色交换(即 A 将苹果放置在智能体 B 前变成 B 将苹果放置在智能体 A 前)、结构改变(即 A 将苹果放置在智能体 B 前和 C 将苹果放置在智能体 D 前，变为 C 将苹果放置在智能体 B 前)。已有研究证实，与格式塔组织相似，两个存在社会交互意图的个体在工作记忆中会被组织在一起，并作为整体单元分组进行存储(Stahl & Feigenson, 2014; Vestner et al., 2019; Ding et al., 2017)。鉴于记忆分组可提升被试对跨整体结构间的区分度，但使得结构内的元素容易混淆(Papeo, 2020; Sedikides et al., 1993; Sherman et al., 2002; Suzuki & Cavanagh, 1995)，可推测当智能体 A 与 B 有交互意图时，相比无交互意图时，由于 A 与 B 被整合成一个具有交互关系的记忆分组，人们更容易辨别其结构改变，而对角色交换不敏感，呈现记忆混淆效应(实验 3a)；反之，则辨别力相当(实验 3b)。

2 实验 1：存在成本最小化信息时的脑电频谱

本实验以顶叶的 μ 节律作为指标，呈现智能体

A 将苹果放置在被栅栏围住的智能体 B 前面，或是被栅栏围住的石头前面，考察前者是否被识别为具有社会性意图。

2.1 被试

21 名在校大学生自愿参与本实验，其中 1 名被试因数据收集过程中电极脱落或运动幅度过大，导致脑电数据质量较差，故予以剔除。最终获得 20 名(其中男性 8 名，女性 12 名)有效被试的实验数据，被试的年龄在 17~24 岁之间(M = 19.5, SE = 0.4)，视力或矫正视力正常，无色盲，均无身心疾病。实验结束后，被试获得 50 元人民币作为报酬。该样本量参考了以往用 μ 指标来探讨动作加工，尤其是对交互行为加工的相关研究，其样本量在 20 名被试左右，结果的效应量处于中等水平(f 介于 0.25~0.46 之间; Kourtis et al., 2019; Yin et al., 2017)。为保持实验样本量的一致性，后续实验中也招募了 20 名有效被试。该实验获得了宁波大学心理学研究伦理委员会同意，且在实验前保证每个被试充分知晓实验要求，并签署了知情同意书。

2.2 实验仪器与刺激

实验采用 19 英寸 CRT 示器，分辨率为 800×600，刷新率为 100 Hz，被试距屏幕约 60 cm。所有刺激材料的呈现和实验流程通过 MATLAB 的工具箱 Psychophysics Toolbox (Brainard, 1997)来控制。

实验刺激材料为电脑动画，其通过 3D 动画建模软件 blender 2.78a 制作而成，显示大小为 11.1°×8.3°。所有动画均设置为从 12.2°的观看距离和 73°的 3D 透视图的视角呈现。动画时长 2 s，其场景中包括两个不同的动画角色(一个运动的智能体，以下称为“智能体 A”，与一个静止的智能体，以下称为“智能体 B”)，一个石头以及一个苹果。其中，每个动画中智能体的外形相异，且每个试次从 36 对不同的组合中随机选择(9 种不同外形的智能体，两两组合而得)。动画中的石头和智能体 B 分布在场景的两侧，其距离中心 2.8°，且均被难以逾越的栅栏围着，但在栅栏中间有个小洞口(智能体无法穿过)，以用于智能体 A 放置苹果。动画开始前苹果位于石头和智能体 B 的正中间，智能体 A 位于屏幕中心上方 1.6°处。整个动画中只有智能体 A 运动，A 首先垂直向下运动至苹果所在位置(0.5 s)，之后向左或向右转向智能体 B 或石头(0.1 s)，接着向智能体 B 或石头运动，并将苹果放置在 B 前方(0.5 s)，最后返回其初始位置(0.9 s)。根据苹果被放置目的地是智能体(图 3a)还是石头(图 3b)，分为两种实验条件。这两种条件除了智能体 A 放置苹果的目的地不同外，具有相同的运动学特性。但当智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前面时，由于其动作成本小于 B 通过自身的动作获得该目标物的成本(需

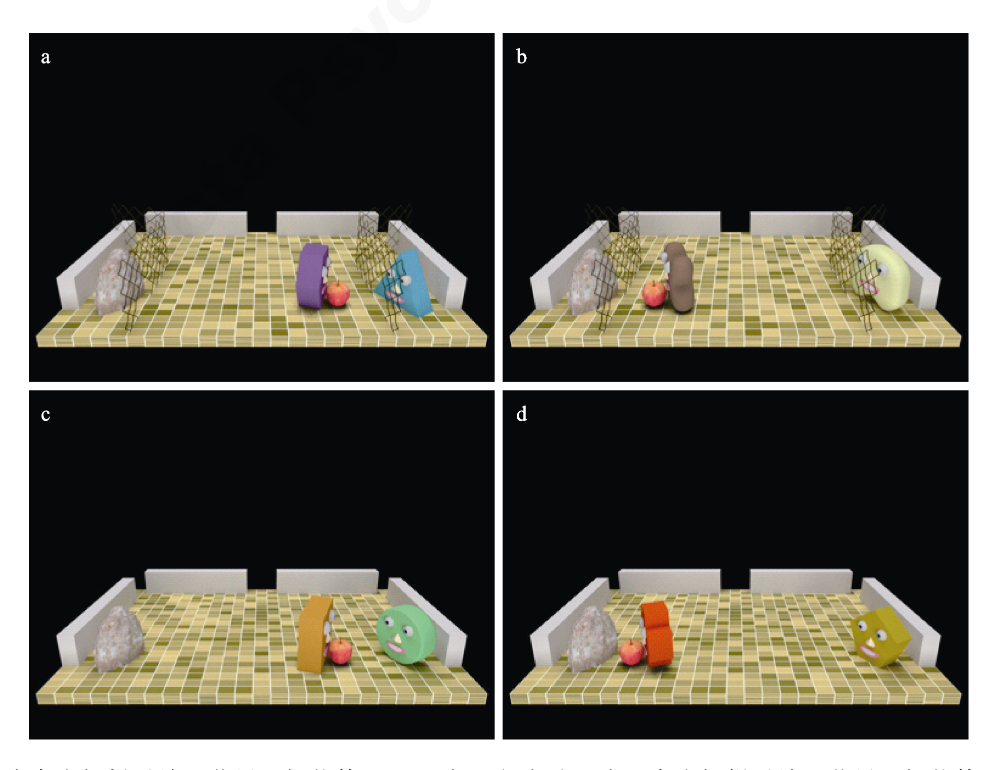


图 3　实验 1 中存在栅栏时放置苹果至智能体(a)和石头(b)与实验 2 中不存在栅栏时放置苹果至智能体(c)和石头(d)的动作示意图

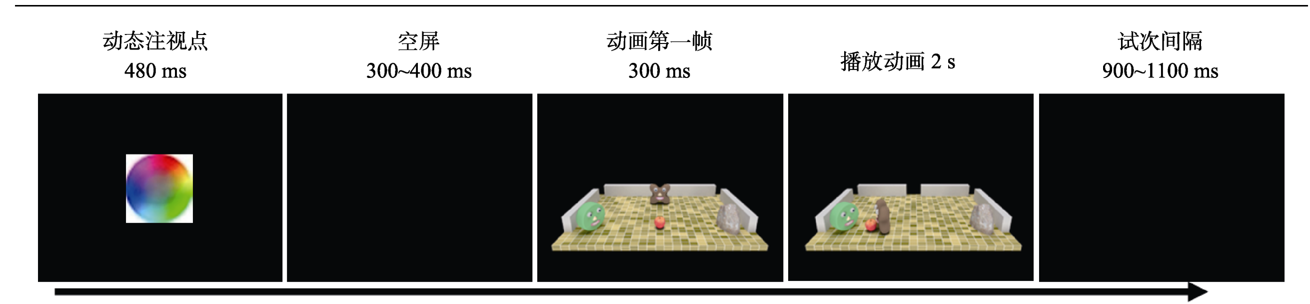


图 4 实验 1 与实验 2 流程示意图

绕过几乎无法逾越的栅栏), 故符合成本最小化条件, 应被识别为具有社会性意图。实验动画示例可见 https://osf.io/jfvxu/?view_only=c76000bc9a4b4f009151638441e79c99。

除了上述两种动画, 实验中还构建了其它动画, 作为填充动画, 要求被试计数其数量, 以使得被试的注意集中在屏幕的动画上。该类动画与上述动画基本相同, 除了在 0.3~1.7 s 之间智能体 A 会随机且连续消失 0.8 s。

2.3 实验流程

每个试次的流程如图 4 所示。首先, 在屏幕中央呈现一个动态的注视点, 持续 480 ms。之后, 空屏 300~400 ms。接着, 呈现动画的第一帧。300 ms 后, 动画开始播放, 持续 2 s。试次间隔为 900~1100 ms。被试被要求认真观看屏幕中的动画, 并计数填充动画的次数, 在每个组块结束后进行报告。

实验共有两个组块, 每个组块包含 72 个正式试次, 其中每个条件包含 36 个试次。每个条件 36 个试次动画中的智能体组合均不相同, 但条件间的智能体组合均相同。如此, 不同条件间除了情境, 其它的物理信息均一致。在前述设置的基础上, 每个组块还包括 8~12 个填充动画, 其用于注意检测。如果被试所报告的填充动画个数与真实的不一致, 则说明该被试可能未认真观看所有的视频。根据该注意检测标准, 被试均能准确报告填充动画个数。

2.4 数据记录

基于 NeuroScan Synamps 2 系统(Compumedics NeuroScan Inc.), 利用国际通用的 10~20 的 64 导 Ag/AgCl 电极帽记录 EEG。以左侧乳突电极为参考。接地电极位于 FPZ 与 FZ 中央。以左眼眶额上、下部的 2 个电极记录垂直眼电(VEOG), 以两眼外侧 1.5 cm 处的 2 个电极记录水平眼电(HEOG)。脑电信号采集增益为 500, 采样频率为 500 Hz, 滤波带通(band-pass)为 0.05~100 Hz。电极和头皮间的电阻均小于 5 kΩ。

2.5 数据分析

采用 MATLAB 的 EEGLAB 和 Fieldtrip 工具包对数据进行分析。首先用 EEGLAB 对数据进行预处理。预处理中, 先将左侧乳突参考转换成左右乳突平均做参考, 之后对数据进行 0.1~100 Hz 的滤波(fir1)。接下来, 删除记录眼电的电极数据, 并进行独立成分分析(ICA)。对获得的独立成分, 采用 EEGLAB 的 ADJUSR 插件识别眼电成分与噪音成分, 并将其剔除[1]。最后, 对脑电数据进行分段, 其长度为开始运动前 500 ms 到运动后 2000 ms (动画结束点)。完成前述处理后, 采用 Fieldtrip 进行频谱分析。具体而言, 对每个分段数据, 首先就 4~30 Hz 的节律, 以 0.5 Hz 为步长进行 Morlet 小波分析(wavelet), 其带宽为 3 Hz; 之后, 以运动开始前 500 ms 的能量值作为基线(此时间长度可保证包含目标分析频段至少 3 个完整的波长), 对每个分段数据(即开始运动前 500 ms 至开始运动后 2000 ms)的能量值进行基线矫正; 最后, 对每个被试按条件进行平均。

与已有研究一致, 本实验选取的 μ 频段为 8~13 Hz (Fox et al., 2016; Muthukumaraswamy et al., 2004; Ulloa & Pineda, 2007)。大量研究表明, 与动作加工相关的 μ 波段主要出现在顶叶运动区, 在脑电研究中常常选取顶叶的 C3 和 C4 电极(Duan et al., 2018; Pomiechowska & Csibra, 2017), 因此本实验也选取 C3 和 C4 电极对 μ 频段的激活模式进行分析。鉴于每个被试由于头皮厚度不同以及电阻不同可能导致 μ 频段激活的差异(Pineda & Oberman, 2006), 借鉴已有研究(Cuevas et al., 2014; Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999), 将动画呈现阶段的 μ 频段能量值减去基线的能量值并除以基线的能量值再乘 100%作为 μ 的能量值。即对于每个被试, 因变量=

[1] 笔者也采用传统的分析方法剔除噪音试次, 即波幅超过±100 μV 的试次被剔除, 在此基础上对 μ 频段能量进行分析, 其结果与采用 ADJUSR 插件删除噪音法所得结果相同。

(动画呈现阶段的 μ 频段能量−基线阶段的 μ 频段能量)/基线阶段的 μ 频段能量×100%, 其值小于零表示抑制。为进一步检验 μ 频段是否属于枕叶 α 活动的泛化, 参考以往研究(Klimesch et al., 2007; Perry et al., 2011), 本实验对枕叶 O1 和 O2 电极上的 α 也予以类似分析, 结果发现两个实验中不同类型动画所诱发的枕叶 α 活动并无差异(详见网络版附录, 其可在 https://osf.io/jfvxu/?view_only=c76000bc9a4b4f009151638441e79c99 获取)。鉴于动态智能体(智能体 A)在运动开始后 600~1000 ms 趋近不同的对象, 且是不同条件下运动模式出现差异的时间段, 故以该时间窗的平均能量作为因变量。

在开展本文所报告的被试间设计实验前, 笔者也采用被试内设计收集了 10 个被试(结果见附录)。但每个被试均报告有无栅栏情境对比明显, 实验者设置栅栏是有目的的, 因此调整成了被试间设计。更重要的是, 对于智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前, 有无栅栏情境在物理层面存在差异(栅栏的遮挡不同), 直接对比所发现的 μ 抑制差异可被物理层面的影响所解释。因此, 将是否存在栅栏时智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前分别与控制条件进行比较, 即目前的被试间设计。

2.6　结果与讨论

不同条件下在不同电极上诱发的 8~13 Hz 频段能量及其差异地形图如图 5 和 6 所示。对 μ 相对能量值进行 2 (电极：C3 与 C4) × 2 (放置目的地：智能体与石头)的重复测量方差分析, 结果发现：仅有放置目的地的主效应显著, $F(1, 19) = 8.71$, $p = 0.008$, $\eta_p^2 = 0.31$, 差异的 95% CI = [−15.1%, −2.6%], 其中当动态智能体将苹果放置在静态智能体(智能体 B)前时, μ 频段能量($M = −17.3\%$, $SE = 3.6\%$)显著强于(抑制程度更高)将其放置在静态石头前的 μ 频段能量($M = −8.5\%$, $SE = 4.6\%$); 电极的主效应不显著, $F(1, 19) = 0.80$, $p = 0.382$; 电极与放置目的地的交互作用不显著, $F(1, 19) < 0.01$, $p = 0.975$。

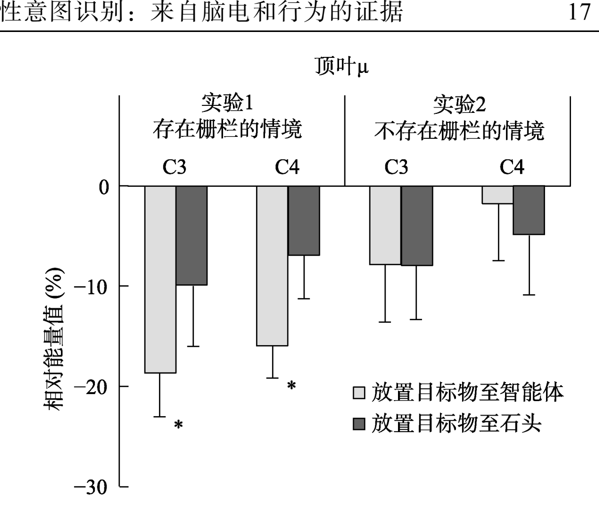


图 5　实验 1 和实验 2 中顶叶 8~13 Hz 频段相对能量值(误差线代表标准误)

对所有电极上的 8~13 Hz 频段能量, 采用基于 Cluster 的置换检验(permutation test; Maris & Oostenveld, 2007), 其中使用蒙特卡洛模拟法, 并将抽样次数设置为 500, 且要求至少相邻的两个电极在苹果被放置至不同目的地时 8~13 Hz 频段能量差异上达到显著。结果依然发现 C3 和 C4 电极上, 苹果被放置在智能体前时 μ 频段抑制程度显著高于苹果被放置在石头前面的条件, 而 O1 与 O2 上则无差异, 其存在差异的电极如图 6c 所示。故上述基于方差分析的结果并不能由所选择电极的特殊性所解释。

上述结果发现, 当智能体 B 被栅栏围住时, 智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前时 μ 抑制强于控制条件——智能体 A 将苹果放置在石头前, 且并非 α 活动的泛化, 其与预测一致, 支持成本最小化信息是社会性意图识别重要线索的观点。

3　实验 2：不存在成本最小化信息时的脑电频谱

实验 1 中当智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前时, 智能体 A 的动作可减少智能体 B 完成目标的

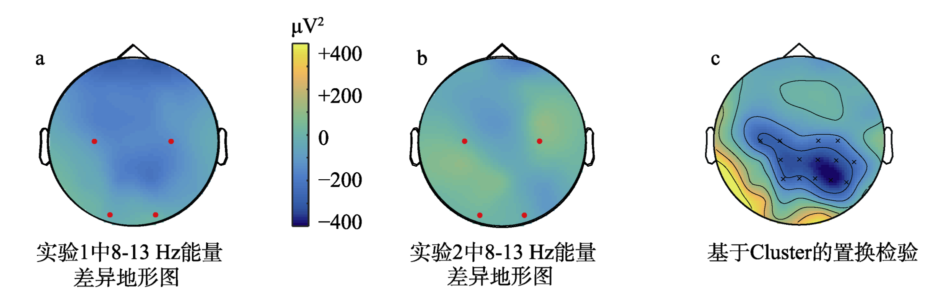


图 6　有无栅栏情境下实验 1(a)和实验 2(b)中 8~13 Hz 频段的差异地形图以及(c)基于 Cluster 置换检验的地形图
注：c 图中符号×表示存在显著差异的电极。

动作成本，即符合成本最小化条件，μ 的抑制程度显著高于被识别为客体导向性意图的控制条件。针对该结果，可能也仅仅是一个智能体趋近另一个智能体，而非成本最小化信息，导致其被识别为社会性意图。本实验将通过去除成本最小化信息的方法，对这一可能性进行检验。实验中，智能体 A 与实验 1 保持相同的运动特性，但将实验 1 中围住智能体 B 和石头的栅栏移除，使得智能体 B 获得苹果的成本小于智能体 A 将苹果放置在其前面的成本(即不符合成本最小化)。若人们确实基于成本最小化信息这一线索识别社会性意图，则当智能体 A 将苹果放置在未被栅栏围住的智能体 B 前时，即不符合成本最小化，实验 1 的效应消失；反之，若效应依然存在，则说明智能体之间社会性意图识别取决于其它线索，如：趋近智能体的行为。

3.1 方法

20 名在校大学生自愿参与本实验(其中男性 8 名，女性 12 名)。被试的年龄在 17~24 岁之间(M = 19.9, SE = 0.4)，视力或矫正视力正常，无色盲，均无身心疾病。

实验设计和流程与实验 1 基本相同，除了趋近的目标物(智能体或石头)前面的栅栏不存在(如图 3c 与图 3d 所示)。数据采集与分析与实验 1 相同。

3.2 结果

不同条件下诱发的 8~13 Hz 频段能量，及其条件间差异地形图如图 5 和图 6 所示。以 μ 频段相对能量为因变量，2 (电极：C3 与 C4) × 2 (放置目的地：智能体与石头)的重复测量方差分析发现：电极的主效应不显著，$F(1, 19) = 2.96$, $p = 0.101$；放置目的地的主效应不显著，$F(1, 19) = 0.18$, $p = 0.677$；二者的交互作用也不显著，$F(1, 19) = 0.49$, $p = 0.494$。采用与实验 1 相同的基于 Cluster 的置换检验，结果未发现有任何电极在不同条件间的 8~13 Hz 能量存在显著差异。

为进一步检验实验 1 的结果确实由于动作识别的差异所致，合并 C3 和 C4 电极上的数据，形成 2 (实验：实验 1 与实验 2；被试间变量) × 2(放置目的地：智能体与石头；被试内变量)的实验设计，对顶叶的 μ 频段能量进行方差分析。结果发现，实验的主效应不显著，$F(1, 38) = 1.33$, $p = 0.257$；放置目的地的主效应也不显著，$F(1, 38) = 1.90$, $p = 0.176$；但两因素的交互作用显著，$F(1, 38) = 4.27$, $p = 0.046$, $\eta_p^2 = 0.10$。且就智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前，存在栅栏时所诱发的 μ 抑制显著($M = -17.3\%$, SE = 3.6%)强于不存在栅栏的情境($M = -4.8\%$, SE = 5.6%; $t(38) = 1.89$, $p = 0.034$, Cohen's $d = 0.60$，其为单尾检验)，而在智能体 A 将苹果放置在石头前时该差异消失($t(38) = 0.28$, $p = 0.390$, Cohen's d = 0.09)。该结果提示实验操纵调节不同动作模式下顶叶的 μ 频段能量，进一步支持实验 1 的结果确实由于动作识别结果的不同所致。

4 实验 3a：存在成本最小化信息时的行为反应

本实验呈现与实验 1 相同的动画，但采用变化觉察范式，基于信号检测论测量被试对不同变化的辨别力，考察是否存在记忆混淆效应，以进一步检验研究假设。

4.1 被试

保持与前述研究相同的样本量，20 名在校大学生自愿参与本实验(其中男性 7 名，女性 13 名)。被试的年龄在 17~24 岁之间(M = 21.2, SE = 0.3)，视力或矫正视力正常，无色盲，均无身心疾病。

4.2 实验材料与流程

实验的刺激材料与实验 1 相同，但流程改为变化觉察范式(如图 7 所示)。具体而言，首先，在屏幕中央呈现一个动态的注视点，持续 480 ms 之后，空屏 300~400 ms。接着，在白框中(11.1°× 8.3°)依次播放 4 个需要记忆的相同模式的动画作为记忆项，每个持续 2000 ms，两者之间有 1000 ms 的空屏间隔。随后，再呈现一个动画，并伴随着白色边框变为红框以提醒被试在呈现检测项，其持续 2000 ms。在检测项消失后，要求被试尽可能准确地判断检测项是否在记忆项中出现过。如果检测项与某个记忆项相同，则要求被试按下“J”键；否则，按下“F”键。如果在 2000 ms 内未按键，程序会自动进入下一个试次。每个试次间隔为 1500 ms。

每个试次中，所有记忆项和检测项的动作模式相同(即运动路径以及是将苹果放置在智能体前还是石头前)，但每个记忆项都是一对外观不同的智能体。在检测项中，基于智能体外观的变化可区分为三种条件，如图 8 所示：(1)无变化，呈现与某个记忆项相同的一对智能体，且智能体的角色保持一致(也即随机抽取一个记忆项作为检测项)；(2)角色交换，检测项中智能体来自某个记忆项，但智能体的角色互换(即 A 将苹果放置在智能体 B 前变成 B 将苹果放置在智能体 A 前)；(3)结构改变，记忆项中某两个动画中占据相同角色的智能体互换(即 A 将

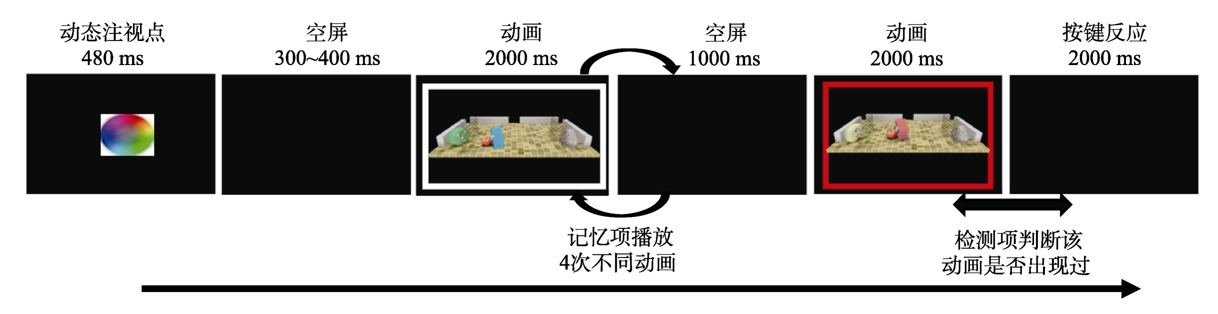


图 7　实验 3 流程示意

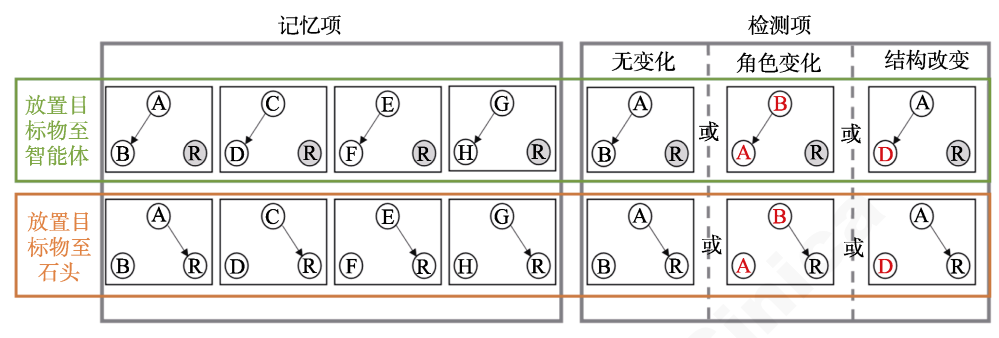


图 8　实验 3 不同条件示意图

注：字母“A”到“H”代表不同的智能体，字母“R”代表石头。

苹果放置在智能体 B 前和 C 将苹果放置在智能体 D 前，变为 C 将苹果放置在智能体 B 前)。据此，由于记忆和检测项的动作模式相同，被试只需根据动画中两个智能体的外观来判断动画的变化，从而可以检测被试对动画中的两个智能体是否进行了记忆分组。

为平衡每种变化类型下的试次数量，无变化条件下的试次等于角色交换和结构改变条件的试次之和。对于无变化条件下的试次，一半的试次被视为没有角色交换，另一半被视为没有结构改变。事实上，在无角色交换和无结构改变条件之间没有区别，只是作为后续数据分析的区分。上述变化条件均出现在目标物放置在智能体前或石头前这两个条件下。每个条件有 20 个试次，结果总共 160 个试次，共分为 4 组，每组结束后休息 5 分钟。所有试次以伪随机顺序呈现，在连续三次试次中不重复相同的条件。

4.3　数据分析

为检验记忆混淆效应，即放置目的地(智能体与石头)是否会调节被试对不同变化的敏感性，根据信号检测论，以“检测项与所有记忆项不同” (即变化)作为信号和“检测项与某个记忆项相同” (即无变化)作为噪音，计算不同变化类型下的敏感性指标 d’，即辨别力(Yin et al., 2018)。为了避免在计算 d’时出现无限大的情况，参考 Snodgrass 和 Corwin (1988)的建议，对每种变化类型下所统计击中、漏报、虚报和正确拒斥的频次均加 0.5，且除以 N+1。其中，N 为对应条件下频次。据此，可获得 2 (变化类型：角色交换与结构改变) × 2 (放置目的地：智能体与石头)的被试内设计的辨别力，对其进行重复测量方差分析。此外，对基于信号检测论计算所得的决策标准 β 也进行了报告，详见网络版附录。

4.4　结果

不同条件下的辨别力如图 9 所示。对辨别力进行 2 (变化类型：角色交换与结构改变) × 2 (放置目的地：智能体与石头)的重复测量方差分析，结果发现：变化类型的主效应不显著，$F(1, 19) = 1.12$, $p =$

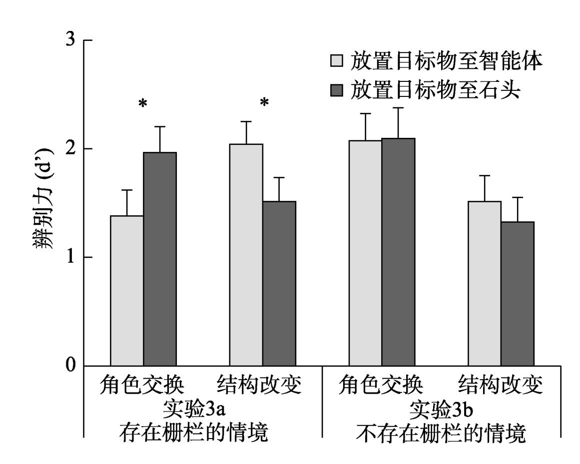


图 9　实验 3a 和实验 3b 中不同条件下辨别力 d’(误差线代表标准误)

0.304; 放置目的地的主效应不显著, $F(1, 19) = 0.11$, $p = 0.746$; 但变化类型与放置目的地的交互作用显著, $F(1, 19) = 8.03$, $p = 0.011$, $\eta_p^2 = 0.30$。简单效应分析发现, 在放置目标物至智能体条件下, 角色交换($M = 1.38$, $SE = 0.24$)的辨别力显著低于结构改变($M = 2.04$, $SE = 0.21$; $t(19) = 2.78$, $p = 0.012$, Cohen's $d = 0.62$), 而在放置目标物至石头条件时, 角色交换($M = 1.97$, $SE = 0.25$)的辨别力显著高于结构改变($M = 1.51$, $SE = 0.23$; $t(19) = 2.26$, $p = 0.036$, Cohen's $d = 0.50$)。更重要的是, 在角色交换条件下, 被试对放置目的地为石头($M = 1.97$, $SE = 0.25$)条件的辨别力显著高于放置目的地为智能体的条件($M = 1.38$, $SE = 0.24$; $t(19) = 2.33$, $p = 0.031$, Cohen's $d = 0.52$); 相反, 当变化类型为结构改变时, 放置目的地为智能体条件下($M = 2.04$, $SE = 0.21$)辨别力显著高于放置目的地为石头的条件($M = 1.51$, $SE = 0.23$; $t(19) = 3.21$, $p = 0.005$, Cohen's $d = 0.72$), 呈现记忆混淆效应。

5 实验 3b：不存在成本最小化信息时的行为反应

为进一步检验成本最小化信息的作用, 与实验 2 相同, 实验 3b 将去除成本最小化信息, 观察实验 3a 的效应是否消失。

5.1 方法

20 名在校大学生自愿参与本实验(其中男性 7 名, 女性 13 名)。被试的年龄在 17~24 岁之间($M = 20.1$, $SE = 0.4$), 视力或矫正视力正常, 无色盲, 均无身心疾病。

实验设计和流程与实验 3a 基本相同, 除了趋近的目标物(智能体或石头)前面的栅栏不存在。数据分析与实验 3a 相同。

5.2 结果

不同条件下的辨别力如图 9 所示。对辨别力进行 2 (变化类型：角色交换与结构改变) × 2 (放置目的地：智能体与石头)的重复测量方差分析, 结果发现：变化类型的主效应显著, $F(1, 19) = 8.14$, $p = 0.010$, $\eta_p^2 = 0.30$, 角色交换条件($M = 2.09$, $SE = 0.25$)的辨别力显著高于结构改变($M = 1.42$, $SE = 0.22$); 放置目的地的主效应不显著, $F(1, 19) = 0.48$, $p = 0.495$; 变化类型与放置目的地的交互作用不显著, $F(1, 19) = 0.64$, $p = 0.434$。

6 讨论

本研究针对视觉可利用哪些信息对社会性(交互)意图进行识别的问题, 提出当某个体 A 协助另一个体 B 达成目标状态所需要的成本小于个体 B 单独达成目标状态所需要的成本(成本最小化信息)时, 视觉系统会将其识别为动作发出方对受益方存在以交互为目的的社会性意图。为检验该假设, 呈现智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前面或石头前面的动画, 并通过在智能体 B 前面设置障碍物(即 B 是否被栅栏围住)的方法操纵成本最小化信息, 以四项实验探讨了成本最小化信息是否是社会性意图识别的线索。结果显示, 相比被识别为客体导向性意图的控制条件(即 A 将目标物苹果放置在石头前), 当 A 将目标物苹果放置在被栅栏挡住的 B 前, 其动作可减少 B 单独获取该苹果的动作成本, 即符合成本最小化条件时, μ 的抑制程度更高(实验 1), 且对结构改变(某两个动画中充当相同角色的智能体互换)的辨别力更强, 但对角色交换(某个动画中两个智能体的角色交换)的辨别力更弱(实验 3a); 而当栅栏不存在时, 虽然 A 的运动路径与实验 1 相同, 但 A 将苹果放置在 B 前的成本大于 B 自身获取苹果的成本, 即不符合成本最小化条件, 条件间 μ 抑制的差异消失(实验 2), 且对不同动作模式中变化的辨别相当(实验 3b)。

针对导致 μ 抑制差异的可能原因, 本研究设置了严格的控制条件, 以确保其只能被意图识别结果的不同所解释。首先, 鉴于存在栅栏和不存在栅栏时智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前的物理差异不同(栅栏的存在以及对智能体 B 的遮挡程度不同), μ 的抑制程度差异可能反映了物理层面的差异, 因此实验中分别将其与各自的控制条件——智能体 A 将苹果放置在石头前进行对比。该设计一方面可更好的排除物理差异的解释：因被试所看到的差异仅是智能体 A 运动朝向的不同, 通过随机化设置可在条件间保持平衡, 故出现 μ 激活程度的差异只能由 A 将苹果放置在 B 前所蕴含的特殊信息所致; 另一方面, 控制条件智能体 A 将苹果放置在石头前属于典型的客体导向性意图, 可为实验条件——智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前提供解释基线：若后者 μ 激活程度与控制条件相当, 则可说明其也被识别为客体导向性意图, 而后者 μ 激活程度高于控制条件, 则可说明其被识别为社会性意图。再者, 对于成本化最小化信息进行了直接操纵(实验 1 与实验 2), 结果发现在不存在成本最小化信息(不存在栅栏)时, 实验条件——智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前, 与控制条件——智能体 A 将苹果放置在石

头前 μ 激活程度相当, 揭示了实验 1 条件间 μ 激活程度的差异确是由于意图识别结果的不同所致。这一结果不仅重复了 Yin 等(2020)发现的 μ 激活程度随着社会性意图的增强而提升的结果, 且进一步扩展了 Yin 等人的研究, 揭示了适用于社会性意图识别的一种新线索(Yin et al., 2020)。Yin 等(2020)的研究中苹果是在智能体 A 的面前, 且无论是 A 转移苹果的成本还是 B 自己拿苹果的成本都相同, 而关键是智能体 A“将自己的物品转移至他人”这一线索引发了社会性意图的识别, 而本研究并无“将自己的物品转移至他人”的动画设置, 而对成本最小化这一线索进行了操纵。

除采用脑电指标对感知到的意图类型进行考察, 本研究还基于变化觉察范式, 采用信号检测论测量被试对不同变化的敏感性。对于存在社会性意图的两个智能体的记忆, 已有研究证明其可被整合成一个记忆分组单元(Stahl & Feigenson, 2014; Vestner et al., 2019; Ding et al., 2017), 因此人们更容易辨别其结构改变, 而对角色交换不敏感, 呈现记忆混淆效应。这一记忆效应出现在了当智能体 A 将苹果放置在被栅栏围住的智能体 B 前, 提示其被识别为具有社会性意图, 进一步验证了基于脑电获得的结论。而当栅栏被去除后, 即去除成本最小化信息, 仅发现对角色交换的辨别力高于结构变化, 其与存在栅栏时对实验 3a 中控制条件不同变化的辨别相当。究其原因, 动画中的施动者(智能体 A)是运动的, 而受动者(智能体 B)保持静止, 当智能体间不存在社会性意图或社会性意图较弱时, 二者并未被记忆分组, 而是以单个智能体进行存储。如此, 当运动的智能体变为静止的智能体时, 物理状态发生了较大改变, 从而使得被试更容易辨别。然而, 这一现象在存在成本最小化信息的条件中(智能体 A 将苹果放置在被栅栏围住的智能体 B 前)弱化, 甚至反转, 进一步说明了其被识别为具有社会性意图, 从而产生记忆分组。

本研究发现某智能体将苹果放置在另一智能体前(不存在成本最小化信息), 其被识别为不具有社会性意图, 其似乎与生活经验相悖。经验上, 只要两个人之间发生接触, 就极有可能被解释为存在社会性意图。但该经验化解释往往具备一定的前提：双方都有行为上的外显反应, 或即使另一方无行为上的反应, 也会赋予内部心理的变化, 如：他内心嫉恨对方。但在人们的日常经验中所涉及的多是有外显反应的交互双方(如握手), 其存在社会性意图识别中的另一重要线索——耦合性线索, 所以会被解释为存在社会性意图。就第一个可能前提, 本研究中只有一方有行为反应(即运动), 而另一方永远静止, 因此很难满足。针对第二个可能前提, 实验 2 中智能体 A 将苹果放置在智能体 B 前确实可认为 A 想与 B 交互, 但 B 不愿意, 但这一解释强烈依赖于对他人的心智进行经验推测, 且强烈依赖于个人的经验, 不具有推理结果的稳定性, 因为不同人有不同的解释。其实, 深入分析也可发现将目标物放置在某人面前并不代表有社会性意图, 如：考试开始前学生将书本放在老师所在的讲台前。为何会产生不同层面的解释？这与人类对行为理解的认知系统有关。人类对行为理解的认知系统被认为分为心智化表征(mentalistic representation)和目的论表征(teleological representation; Gergely & Csibra, 2003)。前者基于对他人可能心理状态的推测, 以解释他人的动作, 其有赖于经验对心理状态的有意思考, 如：即使看到某人表面上对他人行为友善, 观察者可认为这个人内心想加害他人, 因此难以成为社会性意图推理中的通用线索, 其因人而异。而后者基于可被直接观察的要素, 如：情境的约束、动作的成本和收益等这些可容易观察到的要素, 基于效用最大化原则对他人的动作意图进行推测, 其具有自动化加工特性, 不需要任务引导, 其观察到的信息可成为人们识别动作的重要线索之一(Buon et al., 2013)。本研究中, 被试不需要有意对所观察到的动作进行推理, 而是被动地观察并计数可能的填充试次, 更多依赖于对动作的目的论表征。基于该表征, 检测到可依赖的线索——社会性意图识别的充分条件, 即成本最小化信息, 从而将其识别为具有社会性意图。但针对这一识别过程, 若成本最小化信息缺失, 人们可能还会搜寻其他可依赖的线索, 甚至受到个人对他人心智推测经验的影响, 后续研究将对这些问题进一步探讨。

本研究以动画的形式模拟动作, 可对动作发生的情境进行有效操纵, 且可对额外变量进行严格控制, 此方法已被广泛应用于动作理解领域。但该方法所设置的动作对人类的动作进行了一定程度抽象, 其发现的结论还有待在真正的人类动作上检验生态效度。同时, 为有效控制交互双方的动作成本, 本研究对成本最小化信息的操纵主要以智能体 B 实现目标的路径长短实现, 后续研究可进一步操作智能体 B 获取目标的路径长度, 并采用心理物理法获取成本和收益相同的主观等值点, 以此区分成

本最小化信息的分割点，从而检验本研究结论的普遍性。

7 结论

本研究通过设置障碍物的方法操纵当个体 A 协助另一个体 B 达成目标状态所需要的成本是否小于个体 B 单独实现该目标状态所需要的成本，即是否存在成本最小化信息，以指示不同意图类型的脑电 μ 以及对不同变化的辨别力为指标，探讨了人们是否利用成本最小化信息对社会性意图进行识别，获得以下结论：两个个体的行为是否满足成本最小化影响人们对动作意图的识别，揭示成本最小化信息是识别社会性意图的重要线索。

参 考 文 献

Auvray, M., Lenay, C., & Stewart, J. (2009). Perceptual interactions in a minimalist virtual environment. *New Ideas in Psychology*, *27*(1), 32–47.

Blakemore, S. J., & Decety, J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(8), 561–567.

Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, *10*(4), 433–436.

Buon, M., Jacob, P., Loissel, E., & Dupoux, E. (2013). A non-mentalistic cause-based heuristic in human social evaluations. *Cognition*, *126*(2), 149–155.

Canessa, N., Alemanno, F., Riva, F., Zani, A., Proverbio, A. M., Mannara, N., … Cappa, S. (2012). The neural bases of social intention understanding: The role of interaction goals. *PLoS ONE*, *7*(7), e42347.

Centelles, L., Assaiante, C., Nazarian, B., Anton, J. L., & Schmitz, C. (2011). Recruitment of both the mirror and the mentalizing networks when observing social interactions depicted by point-lights: A neuroimaging study. *PLoS ONE*, *6*(1), e15749.

Csibra, G., Bíró, S., Koós, O., & Gergely, G. (2003). One-year-old infants use teleological representations of actions productively. *Cognitive Science*, *27*(1), 111–133.

Cuevas, K., Cannon, E. N., Yoo, K., & Fox, N. A. (2014). The infant EEG mu rhythm: Methodological considerations and best practices. *Developmental Review*, *34*(1), 26–43.

de Jaegher, H., Di Paolo, E., & Gallagher, S. (2010). Can social interaction constitute social cognition? *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(10), 441–447.

Ding, X. W., Gao, Z. F., & Shen, M. W. (2017). Two equals one: Two human actions during social interaction are grouped as one unit in working memory. *Psychological Science*, *28*(9), 1311–1320.

Duan, J. P., Yang, Z. X., He, X. Y., Shao, M. X., & Yin, J. (2018). Automatic attribution of social coordination information to chasing scenes: Evidence from mu suppression. *Experimental Brain Research*, *236*(1), 117–127.

Fox, N. A., Bakermans-Kranenburg, M. J., Yoo, K. H., Bowman, L. C., Cannon, E. N., Vanderwert, R. E., … van IJzendoorn, M. H. (2016). Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, *142*(3), 291–313.

Gergely, G., & Csibra, G. (2003). Teleological reasoning in infancy: The naïve theory of rational action. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(7), 287–292.

Gergely, G., & Jacob, P. (2012). Reasoning about instrumental and communicative agency in human infancy. In F. Xu & T. Kushnir (Eds.), *Advances in child development and behavior: Rational constructivism in cognitive development* (Vol. 43, pp. 59–94). Waltham, MA: Academic Press.

Heider, F., & Simmel, M. (1944). An experimental study of apparent behavior. *The American Journal of Psychology*, *57*(2), 243–259.

Heineman-Pieper, J. (2009). *Reclaiming responsibility: New foundations for a science of and by persons.* Saarbrücken Germany: VDM Verlag Dr. Müller.

Hobbs, K., & Spelke, E. (2015). Goal attributions and instrumental helping at 14 and 24 months of age. *Cognition*, *142*, 44–59.

Jara-Ettinger, J., Gweon, H., Tenenbaum, J. B., & Schulz, L. E. (2015). Children’s understanding of the costs and rewards underlying rational action. *Cognition*, *140*, 14–23.

Klimesch, W., Sauseng, P., Hanslmayr, S., Gruber, W., & Freunberger, R. (2007). Event-related phase reorganization may explain evoked neural dynamics. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *31*(7), 1003–1016.

Kourtis, D., Woźniak, M., Sebanz, N., & Knoblich, G. (2019). Evidence for we-representations during joint action planning. *Neuropsychologia*, *131*, 73–83.

Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of Neuroscience Methods*, *164*(1), 177–190.

Miller, S. (2001). *Social action: A teleological account*. Cambridge: Cambridge University Press.

Muthukumaraswamy, S. D., Johnson, B. W., & McNair, N. A. (2004). Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp. *Cognitive Brain Research*, *19*(2), 195–201.

Oberman, L. M., Hubbard, E. M., McCleery, J. P., Altschuler, E. L., Ramachandran, V. S., & Pineda, J. A. (2005). EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Cognitive Brain Research*, *24*(2), 190–198.

Oberman, L. M., Pineda, J. A., & Ramachandran, V. S. (2007). The human mirror neuron system: A link between action observation and social skills. *Social Cognitive & Affective Neuroscience*, *2*(1), 62–66.

Papeo, L. (2020). Twos in human visual perception. *Cortex*, *132*, 473–478.

Perry, A., Stein, L., & Bentin, S. (2011). Motor and attentional mechanisms involved in social interaction—evidence from mu and alpha EEG suppression. *NeuroImage*, *58*(3), 895–904.

Pfurtscheller, G., & Lopes da Silva, F. H. (1999). Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles. *Clinical Neurophysiology*, *110*(11), 1842–1857.

Pineda, J. O. A., & Oberman, L. M. (2006). What goads cigarette smokers to smoke? Neural adaptation and the mirror neuron system. *Brain Research*, *1121*(1), 128–135.

Pomiechowska, B., & Csibra, G. (2017). Motor activation during action perception depends on action interpretation. *Neuropsychologia*, *105*, 84–91.

Sedikides, C., Olsen, N., & Reis, H. T. (1993). Relationships as natural categories. *Journal of Personality and Social Psychology*, *64*, 71–82.

Sherman, S. J., Castelli, L., & Hamilton, D. L. (2002). The spontaneous use of a group typology as an organizing principle in memory. *Journal of Personality and Social

Psychology, *82*(3), 328–342.
Snodgrass, J. G., & Corwin, J. (1988). Pragmatics of measuring recognition memory: Applications to dementia and amnesia. *Journal of Experimental Psychology: General*, *117*(1), 34–50.
Stahl, A. E., & Feigenson, L. (2014). Social knowledge facilitates chunking in infancy. *Child Development*, *85*(4), 1477–1490.
Suzuki, S., & Cavanagh, P. (1995). Facial organization blocks access to low-level features: An object inferiority effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*(4), 901–913.
Tatone, D., Geraci, A., & Csibra, G. (2015). Giving and taking: Representational building blocks of active resource-transfer events in human infants. *Cognition*, *137*, 47–62.
Török, G., Pomiechowska, B., Csibra, G., & Sebanz, N. (2019). Rationality in joint action: Maximizing coefficiency in coordination. *Psychological Science*, *30*(6), 930–941.
Ullman, T. D., Baker, C. L., Macindoe, O., Evans, O., Goodman, N. D., & Tenenbaum, J. B. (2009). Help or hinder: Bayesian models of social goal inference. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *22*, 1874–1882.
Ulloa, E. R., & Pineda, J. A. (2007). Recognition of point-light biological motion: Mu rhythms and mirror neuron activity. *Behavioural Brain Research*, *183*(2), 188–194.
Vestner, T., Tipper, S. P., Hartley, T., Over, H., & Rueschemeyer, S. A. (2019). Bound together: Social binding leads to faster processing, spatial distortion, and enhanced memory of interacting partners. *Journal of Experimental Psychology: General*, *148*(7), 1251–1268.
Yin, J., Ding, X. W., Xu, H. K., Zhang, F., & Shen, M. (2017). Social coordination information in dynamic chase modulates EEG Mu rhythm. *Scientific Reports*, *7*(1), 1–9.
Yin, J., Ding, X. W., Zhou, J. F., Shui, R., Li, X. Y., & Shen, M. W. (2013). Social grouping: Perceptual grouping of objects by cooperative but not competitive relationships in dynamic chase. *Cognition*, *129*(1), 194– 204.
Yin, J., Tatone, D., & Csibra, G. (2020). Giving, but not taking, actions are spontaneously represented as social interactions: Evidence from modulation of lower alpha oscillations. *Neuropsychologia*, *139*, 107363.
Yin, J., Xu, H. K., Duan, J. P., & Shen, M. W. (2018). Object-based attention on social units: Visual selection of hands performing a social interaction. *Psychological Science*, *29*(7), 1040–1048.

The recognition of social intentions based on the information of minimizing costs: EEG and behavioral evidences

LIN Jing[1], HUANGLIANG Jiecheng[1], HE Yunfeng[1], DUAN Jipeng[2], YIN Jun[1]

([1] *Department of Psychology, Ningbo University, Ningbo* 315211, *China*)

([2] *School of Psychology and Cognitive Science, East China Normal University, Shanghai* 200000, *China*)

Abstract

The recognition of the intentions of observed actions or behaviors is an important social function in the human visual system. Previous research has invested much effort into understanding how the human vision system recognizes object-directed intentions of actions (i.e., actions are implemented to approach physical objects without influencing others). However, actions are also directed to social entities or agents to impact others, which is defined as social intentions (or social interaction intentions).

This study aimed to investigate how vision systems recognize social intentions. For the purpose of demonstrating that individuals involved in social interaction are rational and should maximize the utility of actions overall, this paper proposes the hypothesis that when the costs of Agent A helping Agent B to achieve the goal state are less than the costs of Agent B acting alone to achieve this goal state (i.e., cue of minimizing cost), these two agents are recognized with social intentions.

To test the above hypothesis, we manipulated the theory of minimizing costs by presenting cartoonized animations that depict how two agents move and influence each other. Specifically, a movable Agent A placed an apple in front of Agent B, who is always stationary. In front of Agent B, a fence was either set in place or not, to operationalize the costs of Agent B achieving the target (i.e., the apple). In this case, when a fence was placed in front of Agent B, his path of achieving the target was blocked; accordingly, when Agent A pushed the apple to the front of Agent B and helped Agent B achieve the target, the costs of Agent B (i.e., path) to achieve the target were less than when Agent B achieved the target alone. However, when there was no fence in front of Agent B, the costs of Agent B achieving the target alone were less than the costs of Agent A helping Agent B to achieve the target. In brief, only when there was a fence in front of Agent B, the actions of Agent A in placing the apple in front of Agent B aligns with the information of minimizing costs, and can be recognized as a social intention; when there was no fence in front of Agent B, the object-directed intention should be attributed, as Agent A

approached the target of the apple. To identify the recognized intentions of actions, we measured μ suppression (electroencephalogram oscillations within the 8~13 Hz range in the sensorimotor regions; namely, C3 and C4 channels) related to action understanding. It was suggested that the functional grouping of two individuals in social intentions should induce greater suppression of the representation of individual object-directed actions. To strictly control for the possible low-level differences, the action of Agent A, placing the apple in front of Agent B (i.e., transferring action) was paired with the action of Agent A, placing the apple in front of a stone (i.e., disposing action), which was typically recognized as an object-directed intention, whether the fence was present or not. Each action lasted two seconds, and participants were asked to count the fillers (i.e., incomplete actions) when watching the actions presented on the screen.

In Experiment 1, when the fence was present in front of Agent B, the transferring action (M = –17.3% relative to the baseline) induced more μ suppression than the disposing action (M = –8.5%). More importantly, the occipital α with the same frequency band as μ was not modulated by the action type, but this component was suggested to be functional with attentional mechanisms. These results were further confirmed by cluster-based permutation tests without selecting the channels of interest. In Experiment 2, to test whether the effect in Experiment 1 was dependent upon the information of minimizing costs, the fence was removed and accordingly, the critical information was absent. We found that the difference in μ suppression between transferring and disposing actions was insignificant when the fence was not present.

To further test the hypothesis proposed in this study, we used a behavioral indicator (i.e., measuring the sensitivity of changes). We manipulated the information of minimizing costs, as in Experiments 1 and 2, but participants engaged in a change detection task. In this task, a set of identical actions were memorized in sequence and participants were required to detect whether anything changed in the test animation compared to those previously memorized. It has been suggested that chunking results in more efficient processing of the configuration (e.g., encoding of interactants' identity), but involves a cost for the individual parts within it, resulting in a memory confusion effect. Hence, if Agent A is perceived as having a social intention toward Agent B, they should be chunked in memory. Accordingly, participants would be less likely to detect changes within the interaction (i.e., the roles of Agents A and B in an interaction were swapped during the test; defined as role swap), but would be more likely to detect changes in pair composition (i.e., the recipient in an interaction was replaced by the recipient from another interaction, defined as structure change) relative to kinematically identical non-social transferring actions.

It was found that in Experiment 3a, when the fence was placed in front of Agent B in the role swap condition, participants were more sensitive to such change in the disposing action (M = 1.97, SE = 0.25) than to the transferring action (M =1.38, SE = 0.24); by contrast, in the structure change condition, the sensitivity of detecting such change in the transferring action (M = 2.04, SE = 0.21) was higher than that of the disposing action (M = 1.51, SE = 0.23). In Experiment 3b, when there was no fence in front of Agent B, participants were even more sensitive to the role swap change than the structure change, but it was not influenced by the action type.

It has been widely suggested that the disposing action is attributed to an object-directed intention (i.e., regardless of whether the fence was present or not) and the recognized social intention should induce greater suppression and higher sensitivity for a structure change and lower sensitivity for a role swap change than the recognized object-directed intention. Hence, we concluded that the results, in which the transferring action induced more μ suppression and higher sensitivity for a structure change and lower sensitivity for a role swap change than the disposing action (i.e., when the fence was present), were attributed to the fact that the transferring action was recognized as having a social intention. However, this recognition depends on the information of minimizing costs; otherwise, the difference in μ suppression and different sensitivities of changes between transferring and disposing actions would be observed as well, when the fence was not present. Hence, this study provides solid evidence that when the costs of Agent A helping Agent B to achieve the goal state are less than the costs of Agent B acting alone to achieve this goal state (i.e., minimizing costs), they are recognized with social intentions.

Key words intention recognition, object-directed intention, social intention, minimizing costs, μ suppression

附录：

基于成本最小化信息的社会性意图识别：来自脑电和行为的证据*

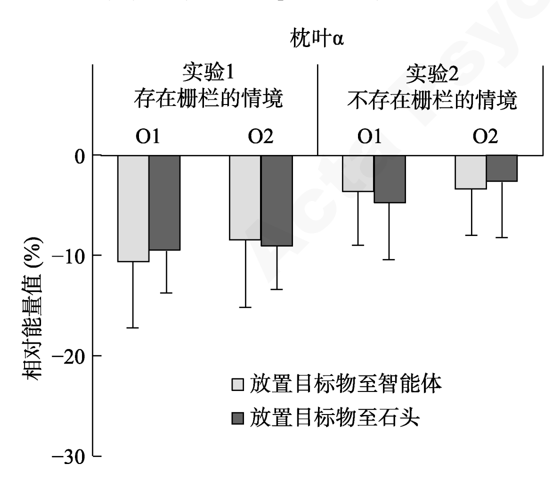
1　枕叶 α 频段能量

1.1　实验 1

不同条件下枕叶 α 频段能量如附图 1 所示。以枕叶 α 频段能量作为因变量, 2(电极：O1 与 O2) × 2(放置目的地：智能体与石头)的重复测量方差分析结果发现：电极的主效应($F(1, 19) = 0.47, p = 0.500$)、放置目的地的主效应($F(1, 19) = 0.01, p = 0.920$)以及二者的交互作用($F(1, 19) = 0.67, p = 0.423$)均不显著。该结果提示, 不同类型动画所诱发的 μ 能量差异并非枕叶 α 活动的泛化。

1.2　实验 2

不同条件下枕叶 α 频段能量如附图 1 所示。同时, 就枕叶 α 频段能量而言, 2(电极：O1 与 O2) × 2(放置目的地：智能体与石头)的重复测量方差分析未发现任何效应显著。其中, 电极的主效应($F(1, 19) = 0.24, p = 0.628$)、放置目的地的主效应($F(1, 19) < 0.01, p = 0.957$)以及二者的交互作用($F(1, 19) = 0.97, p = 0.337$)均不显著。



附图 1　实验 1 和实验 2 中枕叶 8~13 Hz 频段相对能量值(误差线代表标准误)

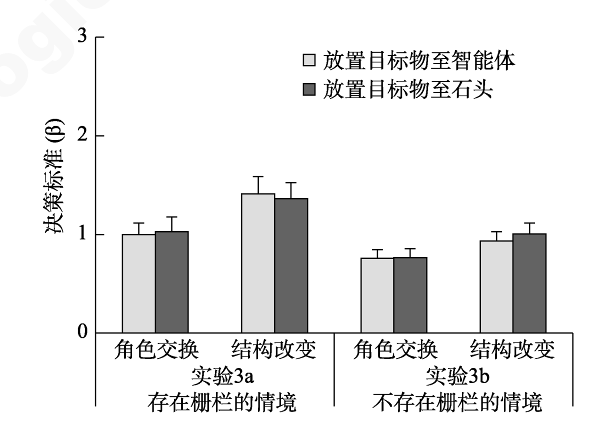
2　决策标准

2.1　实验 3a

就决策标准(附图 2)而言, 2(变化类型：角色交换与结构改变) × 2(放置目的地：智能体与石头)的重复测量方差分析并未发现任何效应显著。其中, 变化类型的主效应($F(1, 19) = 3.60, p = 0.073$)、放置目的地的主效应($F(1, 19) < 0.01, p = 0.953$)以及二者的交互作用($F(1, 19) = 0.13, p = 0.718$)均不显著。

2.2　实验 3b

就决策标准(附图 2)而言, 2(变化类型：角色交换与结构改变) × 2(放置目的地：智能体与石头)的重复测量方差分析未发现任何效应显著。其中, 变化类型的主效应($F(1, 19) = 3.24, p = 0.088$)、放置目的地的主效应($F(1, 19) = 0.26, p = 0.618$)以及二者的交互作用($F(1, 19) = 0.16, p = 0.693$)均不显著。



附图 2　实验 3a 和实验 3b 中不同条件下决策标准 β (误差线代表标准误)

3　被试内设计初步结果

关于被试内设计, 初步收集了 10 名被试。结果发现, 存在栅栏时, 放置至智能体的激活显著强于放置至石头(Wilcoxon $W = 5.00, p = 0.020$, Cohen's $d = 0.82$)；而不存在栅栏时, 激活不存在显著差异(Wilcoxon $W = 34.00, p = 0.557$, Cohen's $d = 0.24$), 且当智能体 A 将苹果放置至智能体 B 时, 存在栅栏时的激活存在显著强于不存在栅栏时激活的趋势(Wilcoxon $W = 9.00, p = 0.064$, Cohen's $d = 0.67$)。